



Топологическая оптимизация деталей с использованием неявного представления геометрической модели

© 2025, А.В. Рипецкий¹, Е.А. Пелих¹ ✉, В.А. Брыкин¹, А.А. Колтаков²

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет, МАИ), Москва, Россия

²АО «Эколибри», Москва, Россия

Аннотация

Рассматриваются методы топологической оптимизации конструкций и особенности их применения. Описываются решётчатые и другие сложные геометрические структуры с регулярно повторяющимися элементарными ячейками, позволяющие обеспечить несплошное внутреннее заполнение деталей с учётом возможности их производства аддитивными технологиями. Выполнена топологическая оптимизация детали с использованием неявного представления геометрической модели для производства её по технологии селективного лазерного плавления металлопорошковых композиций. В результате оптимизации получено снижение массы детали на 27% без ухудшения её прочностных характеристик за счёт изменения геометрии внутреннего заполнения детали. Отмечена важность верификации результатов топологической оптимизации изделий в соответствии с эксплуатационными нагрузками и с учётом особенностей технологий аддитивного производства.

Ключевые слова: геометрическая модель, топологическая оптимизация, масса, конструкция, деталь, аддитивные технологии, селективное лазерное плавление.

Цитирование: Рипецкий А.В., Пелих Е.А., Брыкин В.А., Колтаков А.А. Топологическая оптимизация деталей с использованием неявного представления геометрической модели. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №4(58). С.614-628. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-614-628.

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код проекта FSFF-2023-0004).

Вклад авторов: Рипецкий А.В. – планирование исследования; Пелих Е.А. – анализ данных и представление результатов; Брыкин В.А. – проведение исследования, интерпретация результатов; Колтаков А.А. – анализ и интерпретация данных.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Требования к снижению массы конструкций [1] особенно актуальны в таких областях, как авиация, космонавтика [2, 3] и машиностроение. Аддитивное производство (АП) открыло новые возможности для создания объектов сложных геометрических форм. В частности, технология селективного лазерного плавления (СЛП) металлов [4, 5] позволяет изготавливать детали с внутренними решётчатыми структурами и топологически оптимизированными формами. Существующими стандартами для АП установлены требования к форме изделий, допустимым нависающим элементам и другие технологические ограничения [6, 7].

Цель данной работы – рассмотреть методы топологической оптимизации (ТО) деталей и на примере показать их применимость к АП.

1 Методы оптимизации и модели конструкции

Топологическая оптимизация. ТО – метод распределения материала в заданной области евклидова пространства при заданных нагрузках и граничных условиях [8, 9]. В результате

ТО удаляются менее нагруженные части материала. Недостатки ТО – чувствительность к граничным условиям и риск несоответствия требованиям стандартов для АП [6, 7]. Следствием является необходимость дополнительной обработки полученной модели или комбинирование ТО с другими методами.

Оптимизация формы. При таком подходе изменяется контур (поверхность) детали с целью улучшения её характеристик [10, 11]. Алгоритмы оптимизации формы обычно изменяют геометрические параметры элементов, чтобы уменьшить локальные концентрации напряжений или деформаций. Например, могут сглаживаться острые углы, увеличиваться радиусы переходов в местах высоких напряжений и т.д. При этом общая конструктивно-силовая схема детали сохраняется. Как правило, оптимизацию формы проводят после ТО.

Оптимизация размеров. Этот метод [12, 13] направлен на подбор оптимальных размеров элементов конструкции. Переменными являются размеры элементов (толщина, диаметр, высота и пр.), а целевой функцией – масса конструкции. Оптимизация размеров обеспечивает подстройку конструкции под нагрузки без изменения её общей структуры. Оптимизация размеров используется совместно с другими методами, в т.ч. с ТО.

Перфорации и фигурные вырезы. Это эффективный способ удаления материала в виде отверстий, полостей или вырезов в малонагруженных зонах [14, 15]. Перфорация снижает массу без изменения внешнего контура детали. Метод применим, когда известны распределения нагрузок и зоны, не участвующие в передаче нагрузок.

Орто- и изогридные структуры. Это тип решётчатых рёбер жёсткости, расположенных по регулярной схеме на поверхностях или внутри детали [16]. Ортогрид – решётка из пересекающихся продольных и поперечных рёбер, изогрид – решётка из перекрещивающихся рёбер, образующих треугольные ячейки (равносторонние треугольники). Возможности АП позволяют изготавливать решётчатые панели и расширить область их применения.

Решётчатые структуры. Подразумеваются объёмные периодические ячеистые структуры внутри детали, заменяющие сплошной материал [17]. Решётка состоит из стержней, рёбер или пластин, соединённых в узлах по заданной схеме (кубическая, октаэдрическая и др.). Применение внутренних решётчатых структур позволяет снизить массу, заполняя объём ячеистой материалоподобной средой вместо цельного металла.

Структуры с трижды периодической минимальной поверхностью (ТПМП-структуры). Особый класс периодических пористых структур представляют непрерывные гладкие поверхности сложной формы (минимальные поверхности в трёх измерениях) [18, 19]. К ТПМП относятся гироид, шароид и т.д. В отличие от решёток из стержней, ТПМП-структура образует единую непрерывную сетчатую оболочку внутри объёма. Гладкие формы ТПМП хорошо масштабируются и повторяются в объёме. Обычно ТПМП-вставки размещают внутри замкнутой внешней оболочки детали в зонах, где нагрузка невелика, чтобы уменьшить массу, но сохранить жёсткость. При проектировании изделия для СЛП ТПМП-структуры часто применяют после ТО.

Автоматическое проектирование [20, 21]. Задаются требования к конструкции (нагрузки, крепление, запретные зоны, цели оптимизации), и алгоритм автоматически генерирует допустимые варианты формы изделия. При автоматическом проектировании используются методы оптимизации, в т.ч. с элементами искусственного интеллекта. Например, в программных комплексах (*Autodesk Generative Design*, *nTop*, *SolidEdge* и др.) методом простого перебора предлагаются десятки вариантов формы детали с разными сочетаниями материалов и производственных процессов [22]. Автоматическое проектирование и АП — взаимодополняющие технологии: первая технология позволяет находить оптимальную форму, вторая — воплощает её в реальность.

Консолидация конструкции. Этот метод позволяет оптимизировать состав изделия, объединяя несколько частей в одну [23, 24]. Консолидация актуальна в АП, т.к. позволяет изготовить изделие без сборки из отдельных частей.

2 Топологическая оптимизация для аддитивного производства

Задача ТО не имеет аналитического решения в общем случае и решается численно.

Градиентные методы непрерывной оптимизации [25, 26]. На каждом шаге расчёта производится конечно-элементный (КЭ) анализ, вычисляются чувствительности целевой функции к изменению относительной плотности элемента, и её значения изменяются по правилу, увеличивающему жёсткость при соблюдении ограничения на объём. Процесс итеративный: относительные плотности КЭ постепенно сходятся к 0 или 1. Метод *SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization)* [27, 28] гарантирует сходимость при правильных параметрах. Достоинства градиентных методов – относительная быстрота, недостатки – локальность экстремума.

Методы последовательного удаления/добавления материала. Эти алгоритмы работают непосредственно с дискретной структурой, например, *ESO (Evolutionary Structural Optimization)* [29] итеративно удаляет малонагруженные элементы и пересчитывает напряжения до тех пор, пока не будет выполнено условие оптимальности. Улучшенная версия *BESO (Bi-directional ESO)* [30] позволяет удалять и возвращать материал, если это приводит к достижению цели оптимизации.

Метод задания уровня: граница оптимизируемой формы описывается как уровень (обычно нулевой) скалярного поля $\Phi(x)$ – *level-set* функции [31, 32]. Материал присутствует там, где $\Phi(x) > 0$, а пустота – где $\Phi(x) < 0$. Граница $\Phi(x) = 0$ – это контур детали. *Level-set* метод обеспечивает гладкие границы и топологически допустимые формы с чётким разделением материал/пустота. *Level-set* учитывает геометрические ограничения (минимальную толщину перемычек, радиусы и т.п.), накладывая их на функцию Φ .

Методы гомогенизации [33], в которых материал представляется как сплошная среда с переменной пористостью (микроструктурой). Считается, что каждый точечный объём может быть пористым с оптимальной микрорешёткой внутри. Решается задача оптимального распределения микропористости и происходит формирование дискретной структуры – пористой (типа решётки) либо сплошной. Гомогенизация используется совместно с решётчатыми заполнениями: можно подобрать оптимальный тип и плотность периодической ячейки в каждой части детали для достижения заданных свойств.

Требования аддитивного производства. Результатами ТО является снижение массы детали, но при этом не всегда есть возможность учесть технологические особенности АП. Например, результат ТО может содержать нависающие горизонтальные тонкие элементы, которые невозможно напечатать без поддержек, или изолированные «островки» материала. В алгоритмы ТО вводят учёт производственных ограничений, например, ограничение на минимальный угол наклона элементов относительно горизонтали (чтобы не было неподдерживаемых нависаний). Результат ТО перед передачей в производство проходит этап проверки выполнения рекомендаций по проектированию для АП.

3 Решётчатые и ТПМП-структуры в аддитивном производстве

В традиционном производстве создание внутренних пустот сложной формы затруднено, а в АП это осуществляется с помощью программных комплексов моделирования с неявным представлением геометрической модели (*nTopology* [34], *Materialise 3-matic* [35] и др.).

Параметры и механика решётчатых структур. Решётка характеризуется топологией и размером ячейки. Это определяет относительную плотность материала $\bar{\rho} = m_{\text{решётки}} / m_{\text{полного}}$, которая линейно связана с массой, например, $\bar{\rho} = 0.2$ означает, что 80% – пустой объём. Эффективные свойства решёток зависят от $\bar{\rho}$: модуль упругости $E_{\text{eff}} = E_0 \bar{\rho}^n$ (где n – коэффициент имеет значение 1–2 для разных решёток), предел прочности $\sigma_{\text{eff}} = \sigma_0 \bar{\rho}^m$ ($m \sim 1 - 1.5$). Например, для кубической решётки $n = 1$, а для решётки «октаэдр» $n = 2$. При проектировании надо принимать такие параметры ТО, чтобы сохранить достаточную жёсткость, в т.ч. с учётом возможной потери устойчивости решётки.

Выбор типа внутренней структуры. ТО определяется несущая структура детали и внутри полученного объёма добавляются периодические структуры: непрерывный ТПМП для равномерности либо решётка для контроля. Выбор зависит от характера нагружения.

- 1) Если требуется обеспечение одинаковых физических свойств во всех направлениях и равномерное распределение напряжений, то предпочтителен ТПМП (гироид) внутри оболочки.
- 2) Если важна неоднородность свойств в зависимости от направления нагрузки или нужны каналы для высыпания порошка, то выбирают решётку.

Проектирование решёток и ТПМП с учётом АП. При использовании внутренних пустотелых структур следует учитывать требования стандарта [7]. АП позволяет управлять толщинами каждого элемента за счёт изменения параметров технологических процессов. Если важны требования к точности формы изделия, то рекомендуется предварительно получить фрагменты решётки и экспериментально убедиться в её работоспособности. Можно смоделировать решётку как эффективную среду (через гомогенизацию) и выполнить прочностной анализ оптимизированной решётчатой детали. На практике зачастую ограничиваются оценкой по усреднённым свойствам или анализируют небольшой репрезентативный объём решётки с граничными условиями от макромоделей.

4 Оптимизация детали для селективного лазерного плавления металлопорошковых композиций

Рассматривается пример оптимизации предназначенного для изготовления методом СЛП основания кожуха штанги толкателя (см. рисунок 1а,б,в) двигателя МП 1400 (см. рисунок 1г) для беспилотного летательного аппарата вертикального взлёта и посадки Р-265 (см. рисунок 1д) разработки АО «Эколибри». Изначально деталь спроектирована как тонкостенная литая, в основании которой имеется полый объём, не участвующий в работе. Цель оптимизации – снизить массу детали, обеспечив достаточную жёсткость при рабочих нагрузках.

4.1 Подготовка конечно-элементной модели

Трёхмерная модель спроектированного основания кожуха была импортирована в *nTopology* в формате *STEP* и преобразована в неявно заданное тело. Неявное представление геометрии в *nTopology* основано на использовании полевых функций, которые определяют форму объекта не через поверхности и сетки, а через непрерывные математические описания пространства. Такой подход позволяет легко создавать сложные конструкции, плавно сочетать различные области и обеспечивать устойчивость к изменениям параметров. В отличие от традиционных *CAD*-систем, где модель хранится в виде явных поверхностей, неявное ядро *nTopology* обеспечивает высокую гибкость при генеративном проектировании и оптимизации структур. Для задания граничных условий (см. рисунок 1б) выделены поверхности крепёжных отверстий и поверхности цилиндров штанг (зоны приложения нагрузки). Область проектирования – внутренний объём изделия с отступом 1 мм от поверхности изделия (см. рисунок 1в). Выбранные граничные условия и зоны нагружения адекватно воспроизводят

основные направления передачи сил и концентрации напряжений, достаточные для постановки задачи оптимизации.

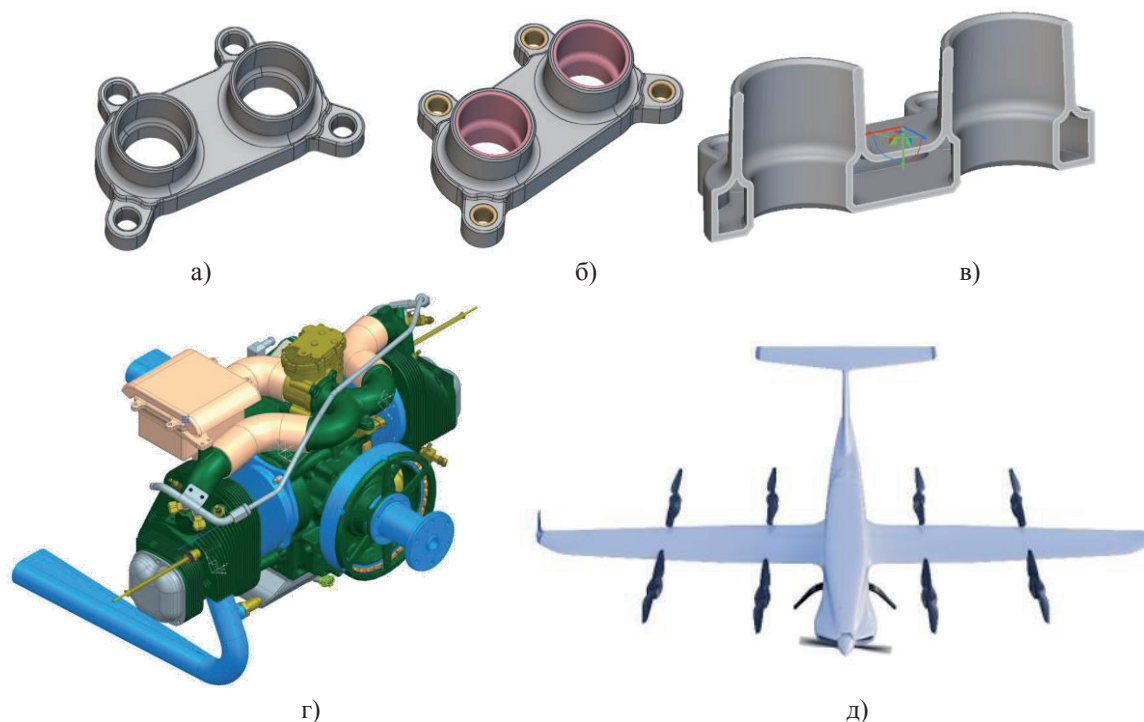


Рисунок 1 – а) Трёхмерная модель основания кожуха штанги толкателя в *nTopology*; б) STEP-модель и зоны фиксации/нагружения в *nTopology*; в) проектируемая область изделия; г) двигатель МП 1400; д) беспилотный летательный аппарат вертикального взлёта и посадки Р-265

Для проведения расчёта неявно заданное тело детали необходимо представить КЭ моделью. В *nTopology* существует ряд блоков и инструментов, которые позволяют контролировать качество и структуру поверхностной сетки перед созданием твёрдотельной тетра-сетки: например, можно задать длину ребра, минимальный размер деталей и адаптивность по кривизне. После того, как поверхностная сетка приведена к нужному уровню качества и топологии, она может быть преобразована в твёрдотельную сетку, что обеспечивает совместимость интерфейсов и тетра-элементов на границах.

В начальной дискретизации использовано значение допуска 0,1 мм и максимальный размер элемента (треугольника сетки) – 3 мм. (см. рисунок 2а). Равномерная КЭ сетка с одинаковыми элементами перестроена с использованием адаптивных параметров (см. рисунок 2б) с настройками: размер ребра 0,2–0,5 мм; допуск – 0,01 мм; рост ребра – 2; тип элементов – тетраэдры линейного порядка; параметр учёта резких границ – 45°.

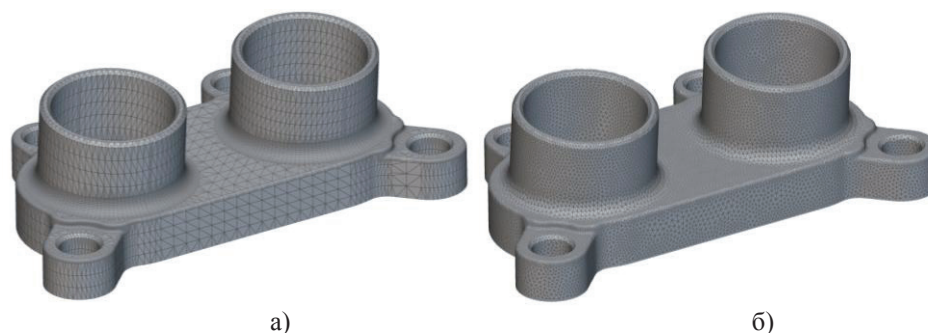


Рисунок 2 – а) сетка трёхмерной модели детали; б) перестроенная конечно-элементная сетка

Параметр роста ребра определяет, насколько быстро увеличивается размер элемента при удалении от геометрически сложных участков (например, от острых краёв). Значение 2 означает, что каждый следующий слой КЭ может быть в два раза крупнее предыдущего. Для большинства задач ТО (особенно на предварительном этапе) линейные КЭ предпочтительны. Настройка сетки выполнена с целью сохранения геометрических особенностей модели, в том числе радиусных сопряжений и тонкостенных зон, участвующих в восприятии нагрузки. Такая структура сетки позволяет адекватно отразить распределение напряжений в зонах с потенциальной концентрацией напряжений.

4.2 Первичный статический расчёт

Для проведения статического расчёта модели в *nTopology* использован материал *AlSi10Mg* из встроенной библиотеки, обладающий типичными для алюминиевых сплавов свойствами при СЛП: модуль упругости ~ 70 ГПа; предел текучести ~ 230 МПа; плотность $\sim 2,67$ г/см³. Предполагается применение российского аналога – сплава РС-300, сертифицированного для отечественных установок СЛП и имеющего незначительные отличия свойств.

Выполнен линейный статический расчёт напряжённо-деформированного состояния конструкции в установившемся режиме при заданных нагрузках и закреплениях. В номинальном режиме моделируется эксплуатационная нагрузка (см. рисунок 3а). В пиковом режиме моделируется ситуация перегрузки (см. рисунок 3б). Нагрузка распределялась по всей поверхности посадки цилиндров.

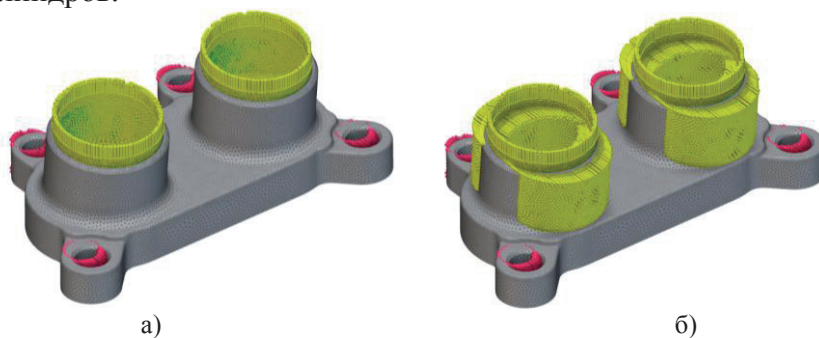


Рисунок 3 – Варианты нагружения для: а) номинального режима эксплуатации; б) пикового режима эксплуатации

Максимальные перемещения в модели (см. рисунок 4а) не превышают 41 мкм, наибольшие смещения наблюдаются в центральной зоне корпуса, между двумя цилиндрами штанги толкателя.

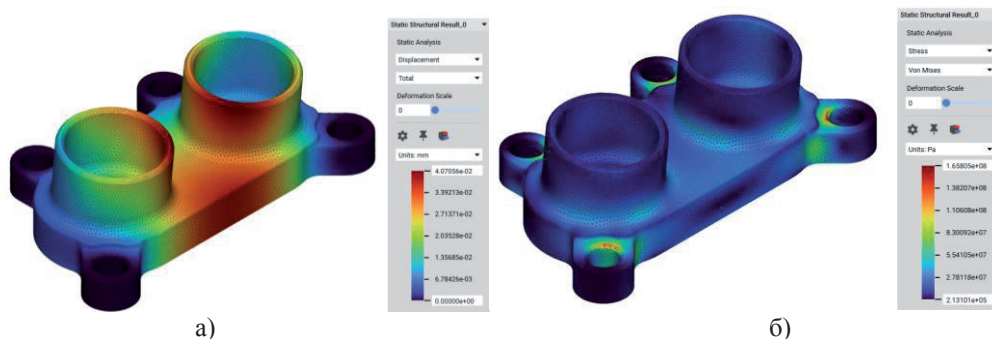


Рисунок 4 – Результаты статического расчёта: а) поле перемещений; б) распределение напряжений

Полученные деформации находятся в диапазоне допустимых для тонкостенных алюминиевых элементов с крепёжной функцией. Максимальные напряжения (по Мизесу, см. рису-

нок 4б) достигают 165,8 МПа и локализуются в зонах сопряжения опорных отверстий и боковых поверхностей корпуса. Эти зоны характеризуются геометрическими переходами и стыками с высокими градиентами напряжений. С учётом предела текучести для сплава *AlSi10Mg* в условиях СЛП-печати (240–260 МПа), полученные значения находятся в допустимой области.

Использование неявной геометрии в *nTopology* позволяет задавать нагрузки, закрепления и другие расчётные условия на этапе проектирования без многократного перехода между средой моделирования *CAD* и средой КЭ расчёта.

4.3 Топологическая оптимизация конструкции

Результаты статического расчёта позволяют перейти к оптимизации конструкции. В данном случае она осуществляется посредством ТО и ТПМП-заполнения. В модуле оптимизации задана цель: минимизация целевой функции при ограничении доли оставляемого объёма не более 20% от исходного. Параметры расчёта: максимальное число итераций 50; минимальное изменение функции цели (критерий сходимости) 0.0005; минимальная плотность (элементы с меньшей плотностью считаются незначимыми и отбрасываются) 0.01; штраф на границы (параметр, сглаживающий переходы) 0.5. Результатом оптимизации является распределение относительной плотности материала внутри исходного объёма (см. рисунок 5).

Близкие к единице значения (красная зона) соответствуют участкам, которые следует сохранить как несущие. Зоны с плотностью ниже порога отсекаются при формировании итоговой формы тела (см. рисунок 6).

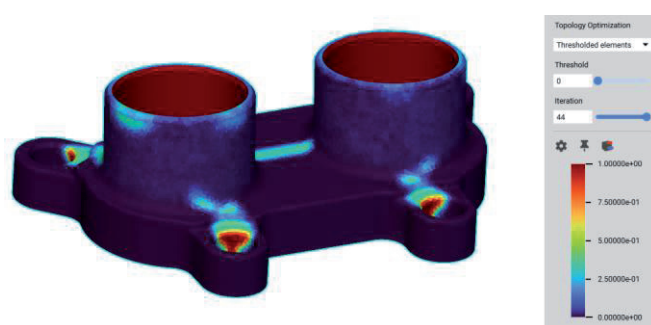


Рисунок 5 – Результат оптимизации: распределение плотности материала

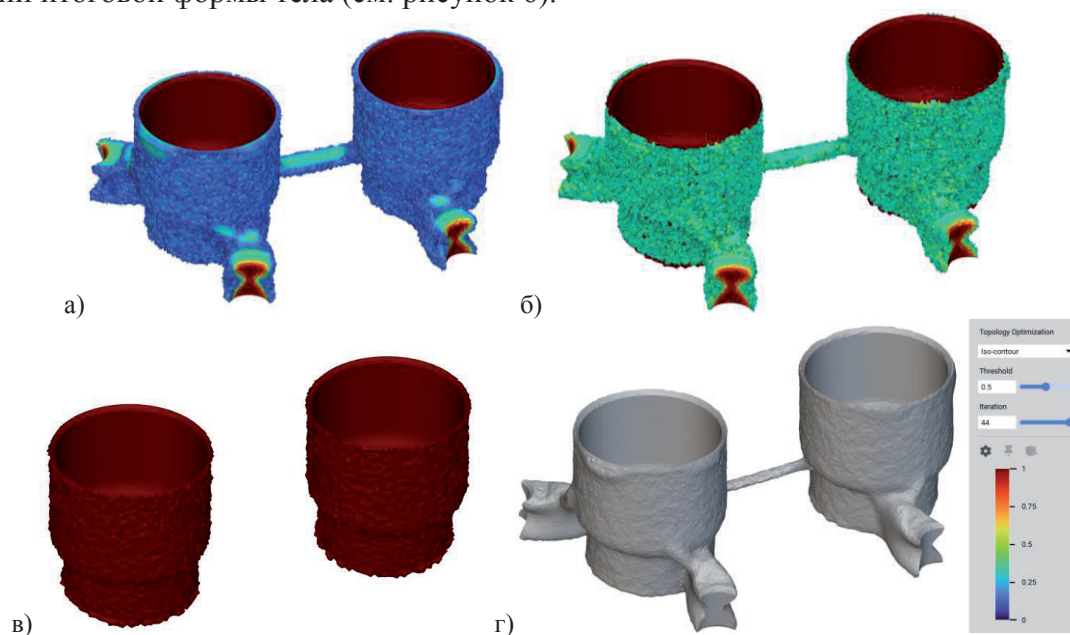


Рисунок 6 – Варианты формы (топологии) детали после оптимизации. Порог отсека: а) 0,1; б) 0,3; в) 1; г) 0,5

Значение порога отсечения влияет на то, какие элементы результирующей топологии сохраняются. Установка значения, стремящегося к нулю, приводит к включению в итоговую форму всех элементов, в т.ч. тех, которые получили нулевую плотность. В работе используется значение порога отсечения 0,5, что обеспечивает баланс между массой и сохранением несущих элементов (см. рисунок 6г).

В результате топологической оптимизации деталь имеет шероховатую, неровную структуру, в которой отдельные зоны могут быть плохо приспособлены к АП (например, содержать островки, острые пики, резкие перепады толщин). Для устранения этих недостатков используется инструмент сглаживания.

Результирующее тело (см. рисунок 7а) доступно для последующих операций, не теряя связности и параметричности. Отсечённый объём может быть использован для формирования внешней оболочки детали, внутренние полости которой заполняются в дальнейшем микроструктурой (см. рисунок 7б).

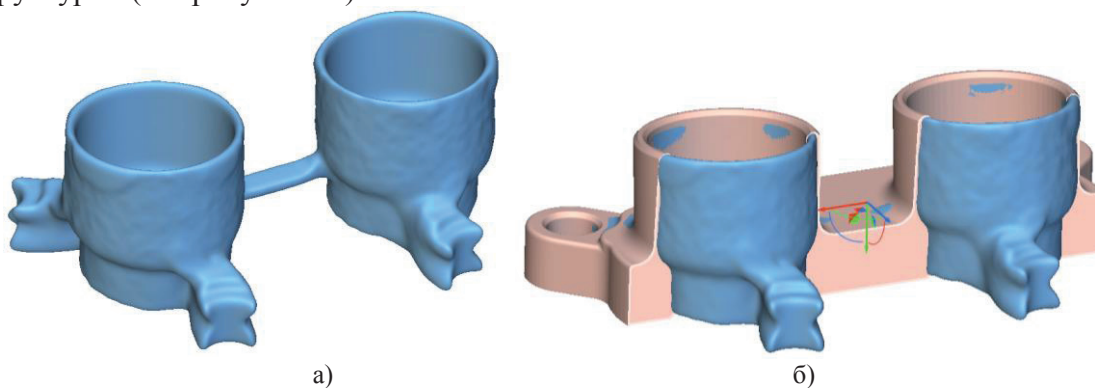


Рисунок 7 – а) модель изделия после топологической оптимизации и сглаживания;
б) области исходной CAD-геометрии, не вошедшие в топологически оптимизированную модель

Этот подход обеспечивает сохранение внешних габаритов и поверхностей, восполнение функционального объёма менее нагруженными, но жёсткими структурами и адаптацию конструкции для СЛП. В качестве базовой ТПМП-ячейки использована гироидная структура благодаря её непрерывной трёхмерной поверхности без самопересечений, что обеспечивает высокое отношение прочности к массе и одинаковые механические свойства в разных направлениях. Такая структура характеризуется равномерным распределением напряжений, что делает её перспективной для применения в АП.

Результат ТПМП-заполнения можно увидеть на поперечном срезе изделия (см. рисунок 8а, б). Гироидная структура расположена во внутреннем объёме. При этом внешняя оболочка толщиной 1 мм остаётся сплошной, что обеспечивает целостность поверхностей касания. При необходимости структура может быть адаптирована под переменную плотность.

Объединение результатов этапа ТО и гироидного заполнения выполнено с использованием операций булевой геометрии. Результат (см. рисунок 8в, г) включает внешнюю оболочку, полученную эквидистантным отходом от поверхности импортированной CAD-модели, результат ТО (каркас) и внутреннюю ТПМП-структуру, размещённую в оставшемся объёме. Булевая операция объединения выполняется между сглаженным неявным телом и телом, содержащим заполнение. При этом обеспечивается непрерывность формы, а внутреннее заполнение вписывается в оставшийся резервный объём без нарушения толщины стенок или пересечений. Такой подход позволяет одновременно сохранить оптимизированный несущий каркас в наиболее нагруженных участках, жёсткое, но лёгкое заполнение в менее нагруженных зонах, а также точную внешнюю форму. Объединение в одну геометрическую модель является особенностью геометрического ядра *nTopology*.

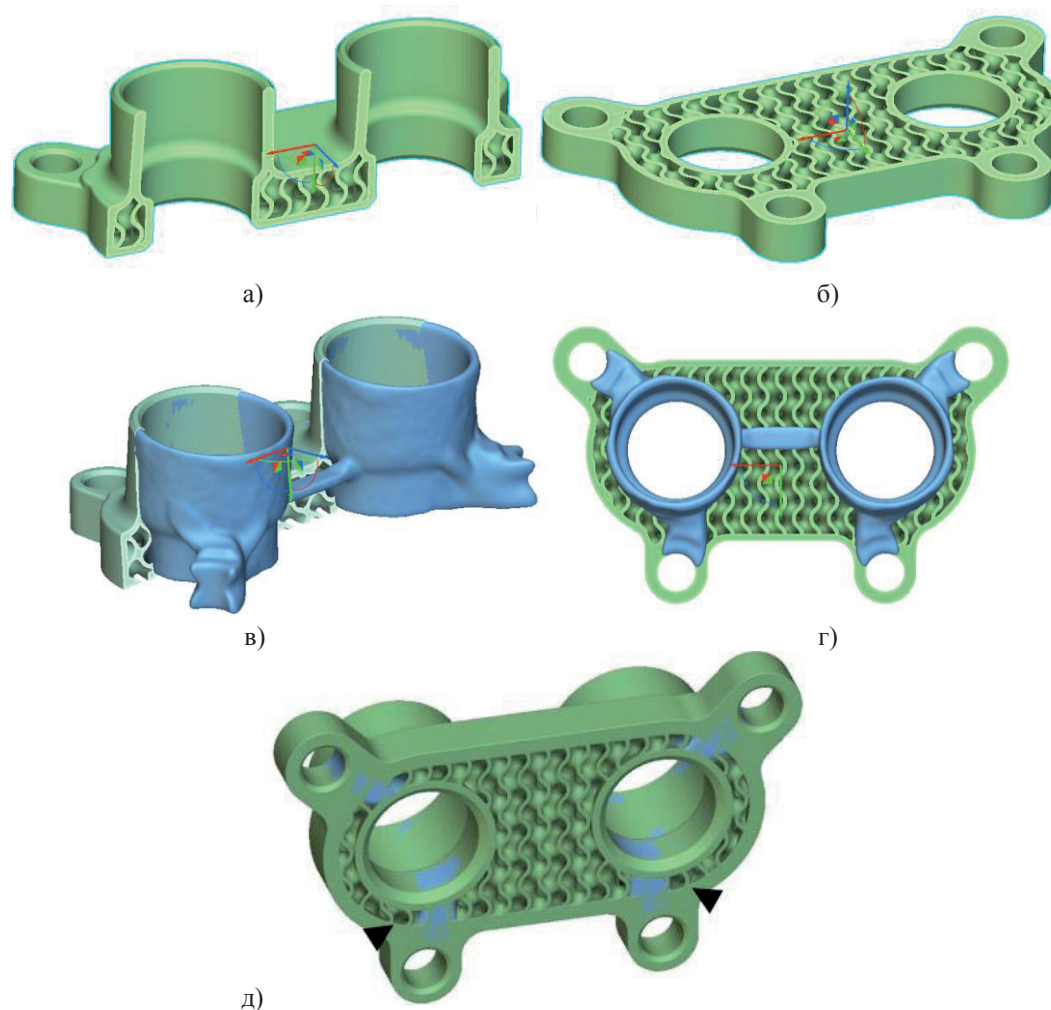


Рисунок 8 – а, б) разрезы детали с ТПМП-заполнением; в, г) итоговая конструкция после объединения оболочки, гироидного заполнения и оптимизированного каркаса (поперечный и фронтальный срезы); д) вырез для удаления порошка из ТПМП-структуры

Для обеспечения технологической реализуемости выполнен вырез внутреннего канала в зоне гироидного заполнения (см. рисунок 8д). Этот канал предназначен для удаления несплавленного порошка после печати.

После объединения оптимизированной оболочки и гироидного заполнения рекомендуется выполнить повторный статический анализ с целью проверки жёсткости и прочности итоговой модели. Важно провести расчёт с теми же граничными условиями. Прямая оценка механических характеристик ТПМП-структур затруднена в рамках КЭ расчёта и требует значительных вычислительных мощностей. Для поверочного расчёта прочности моделей с микроструктурным заполнением применяют многоуровневый подход: сначала вычисляются свойства элементарной ячейки, которые используются в общей модели конструкции, а затем свойства элементарной ячейки экстраполируются на весь объём детали.

В результате проведённой ТО удалось достичь снижения массы детали на 27 % при сохранении прочностных характеристик. Полученное решение сочетает преимущества ТО и ТПМП, что показывает возможность применения подхода на другие детали силовой установки.

4.4 Верификация и цифровая интеграция

При проектировании конструкций для АП необходимость проверки того, что оптимизированная геометрия детали удовлетворяет всем требованиям, обусловлена тем, что ТО может привести к появлению зон, работающих на пределе прочности. Неточность в расчётах или технологии способна вызвать местные нарушения прочности или потерю устойчивости. Поэтому каждая итерация оптимизации должна сопровождаться КЭ расчётом новой геометрической формы [36, 37].

Цифровая интеграция включает учёт технологических отклонений действительной формы от номинальной (усадка, погрешность лазера, шероховатость). Возможна проверка формы полученной детали её сканированием и сопоставлением с моделью. Если обнаружены расхождения (например, тонкие ребра не пропечатались полностью), то в цифровую модель можно внести поправки (усилить элементы) и повторить цикл.

На основе статистических данных (например, прочности материала с учётом пористости при печати, которую можно оценить неразрушающим контролем) модель можно уточнить. В итоге, пройдя все этапы: оптимизация → анализ → прототип → испытание → корректировка модели – можно утвердить итоговую конструкцию к серийному АП.

Заключение

Развитие методов ТО конструкции минимальной массы и их интеграция с АП открывают перед конструкторами новые возможности: сложные органические формы, внутренние решётки, объединение деталей – всё это можно осуществить при помощи АП, минуя ограничения традиционных технологий производства.

Применение описанных подходов позволяет добиться максимальной экономии массы и удовлетворения требований прочности, жёсткости с учётом производственных ограничений. Как показал пример, следование многоуровневой методике (*CAD* → КЭ расчёт → ТО → ТППИ-структуры → проверка технологичности → прототипирование) позволяет получить оптимизированную деталь, готовую для АП.

Ключевым этапом остаётся верификация – цифровая и физическая. Цифровые технологии позволяют проводить большую часть таких проверок виртуально.

Список источников

- [1] **Комаров В.А.** Проектирование силовых аддитивных конструкций: теоретические основы. *Онтология проектирования*. 2017. Т.7, №2(24). С.191-206. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-2-191-206.
- [2] **Космодемьянский Е.В., Нагиев А.В., Изратов Д.Ю., Кирпичев В.А., Давыдов П.А., Маркарова А.А., Козлова И.В., Окунин А.Ю., Пустовалов А.Ю.** Проект космического ракетного комплекса на базе ракетносителя сверхлёгкого класса. *Онтология проектирования*. 2018. Т.8, №4(30). С.523-539. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-4-523-539.
- [3] **Ткаченко И.С.** Анализ ключевых технологий создания многоспутниковых орбитальных группировок малых космических аппаратов. *Онтология проектирования*. 2021. Т.11, №4(42). С.478-499. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-478-499.
- [4] **Грибова В.В., Кульчин Ю.Н., Никитин А.И., Тимченко В.А.** Ансамбль онтологических моделей для обеспечения интеллектуальной поддержки лазерных аддитивных технологических процессов. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №2(52). С.279-300. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-2-279-300.
- [5] **Кишов Е.А.** Математическое моделирование нестационарного теплопереноса в селективном лазерном плавлении на основе машинного обучения. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №1(55). С.142-151. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-142-151.
- [6] ISO/ASTM 52910:2018. Additive manufacturing — Design — Requirements, guidelines and recommendations. — Geneva: ISO/ASTM International, 2018. 24 p.

- [7] ISO/ASTM 52911-1:2019. Additive manufacturing — Design — Part 1: Laser-based powder bed fusion of metals. — Geneva: ISO/ASTM International, 2019. 38 p.
- [8] **Bendsøe M.P., Sigmund O.** Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications. Berlin; Heidelberg: Springer, 2003. 370 p.
- [9] **Deaton J.D., Grandhi R.V.** A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2014. Vol.49, №1. P.1-38. DOI: 10.1007/s00158-013-0956-z.
- [10] **Sokolowski J., Zolésio J.-P.** Introduction to Shape Optimization: Shape Sensitivity Analysis. — Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1992. 250 p.
- [11] **Henrot A., Pierre M.** Variation et optimisation de formes: Une analyse géométrique. Berlin: Springer, 2005. 360 p.
- [12] **Arora J. S.** Introduction to Optimum Design. — 4th ed. — Oxford: Academic Press (Elsevier), 2016. 968 p.
- [13] **Kirsch U.** Optimum structural design: concepts, methods, and applications. New York: McGraw-Hill, 1981. 441 p.
- [14] **Burchill M.A., Paulino G.H.** A framework for optimal design of free-form holes in plates using an integral-equation approach. *Computers & Structures*. 2004. Vol.82, №23–26. P.1823–1840. DOI: 10.1016/j.compstruc.2004.05.013.
- [15] **Rezaeepazhand J., Jafari M.** Stress analysis of perforated composite plates. *Composite Structures*. 2005. Vol.71, №3–4. P.463–468. DOI: 10.1016/j.compstruct.2005.09.003.
- [16] **Wang D., Quek S. T., Ang K. K.** Global and local buckling analysis of grid-stiffened composite panels. *Composite Structures*. 2015. Vol.119. P.20–28. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.08.015.
- [17] **Panesar A., Abdi M., Hickman D., Ashcroft I.** Hierarchical lattice structures: A review. *Additive Manufacturing*. 2018. Vol.19. P.81–94. DOI: 10.1016/j.addma.2017.11.003.
- [18] **Maskery I., Sturm L., Aremu A. O., Panesar A., Williams C. B., Tuck C., Ashcroft I.** Insights into the mechanical properties of several triply periodic minimal surface lattice structures made by polymer AM. *Polymer*. 2018. Vol.152. P.62–71. DOI: 10.1016/j.polymer.2017.11.049.
- [19] **Yang L., Harrysson O.L., West H., Cormier D.** Mechanical properties of gyroid TPMS for AM. *Additive Manufacturing*. 2018. Vol.25. P.126–136. DOI: 10.1016/j.addma.2018.10.036.
- [20] **Wang C., Chen S., Ning X., Zhu J., Wang M.** Generative-Design by Embedding Topology Optimization. *Journal of Mechanical Design*. 2023. Vol.145, №11. 114501. DOI: 10.1115/1.4063319.
- [21] **Barbieri L., Colombo G., Degliesposti G., Favi C., Mandorli F.** Performance-driven engineering design approaches: from topology optimization to generative design. *Applied Sciences*. 2022. Vol.12, №23. 12298. DOI: 10.3390/app122312298.
- [22] nTopology. Structural Optimization: 7 Design Tips for Lighter Designs. *nTopology Blog*. 2022. <https://ntopology.com>.
- [23] **Schmelzle J., Kline E., Dickman C.J., Reutzel E.W., Jones G., Simpson T.W.** (Re)Designing for part consolidation: Understanding the challenges of AM. *Journal of Mechanical Design*. 2015. Vol.137, №11. 111404. DOI: 10.1115/1.4031156.
- [24] **Yang S., Zhao Y.F.** Additive manufacturing-enabled part count reduction: a lifecycle perspective. *Journal of Manufacturing Processes*. 2015. Vol.20, №3. P.316–322. DOI: 10.1016/j.jmapro.2015.07.001.
- [25] **Svanberg K.** The method of moving asymptotes — a new method for structural optimization. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1987. Vol. 24, № 2. P.359–373. DOI: 10.1002/nme.1620240207.
- [26] **Svanberg K.** A class of globally convergent optimization methods based on conservative convex separable approximations. *SIAM Journal on Optimization*. 2002. Vol.12, №2. P.555–573. DOI: 10.1137/S1052623499362822.
- [27] **Bendsøe M.P.** Optimal shape design as a material distribution problem. *Structural Optimization*. 1989. Vol.1, №4. P.193–202. DOI: 10.1007/BF01650949.
- [28] **Rietz A.** Sufficiency of a finite exponent in SIMP (power law) methods. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2001. Vol.21, №2. P.159–163. DOI: 10.1007/s001580050180.
- [29] **Tanskanen P.** The evolutionary structural optimization method: theoretical aspects. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2002. Vol.191, №47–48. P.5485–5498. DOI: 10.1016/S0045-7825(02)00436-1.
- [30] **Huang X., Xie Y.M.** Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures: Methods and Applications. Chichester: Wiley, 2010. 309 p.
- [31] **Wang M.Y., Wang X., Guo D.** A level set method for structural topology optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2003. Vol.192, №1–2. P. 227–246. DOI: 10.1016/S0045-7825(02)00559-5.
- [32] **Allaire G., Jouve F., Toader A. M.** Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method. *Journal of Computational Physics*. 2004. Vol.194, №1. P.363–393. DOI: 10.1016/j.jcp.2003.09.032.
- [33] **Allaire G.** Shape Optimization by the Homogenization Method. New York: Springer, 2002. 456 p.
- [34] **Song R., Liu Z., Wang X.** Lattice Design and Advanced Modeling to Guide the Design of High-Performance Lightweight Structural Materials. *Energies*. 2024. Vol.17, № 6. 1468. DOI: 10.3390/en17061468.

- [35] **Bertolini M., et al.** Evaluation of segmentation accuracy and its impact on CFD results: comparison of Mimics (Materialise) и 3D Slicer. *The Visual Computer*. 2022. Vol.38, №10. P.3465-3478. DOI: 10.1007/s00371-021-02288-y.
- [36] **Peto M., Foy C., McPhillips M., et al.** Review on Structural optimization techniques for additively manufactured implantable medical devices. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2024. Vol.10. Art. 1353108. DOI: 10.3389/fmech.2024.1353108.
- [37] **Özdemir M.** Light-weight design of aerospace components using genetic and dandelion optimization algorithms. *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*. 2024. Vol.17, №2. P.47-58.

Сведения об авторах



Рипецкий Андрей Владимирович, 1979 г.р. Окончил МАИ в 2002 г., к.т.н. (2006). Доцент кафедры инженерной графики МАИ. Руководитель лаборатории аддитивных технологий центра аэрокосмических материалов и технологий Передовой инженерной школы МАИ. В списке научных трудов более 120 работ в области аддитивных технологий. Author ID (РИНЦ): 144971; ORCID ID: 0000-0003-3446-6717. Author ID (Scopus): 55976658900; Researcher ID (WoS): S-6932-2019. a.ripetskiy@mail.ru.

Пелих Евгений Александрович, 1999 г.р. Окончил МАИ в 2017 г. Научный сотрудник НИО-904 кафедры инженерной графики МАИ. В списке научных трудов около 10 работ. Author ID (РИНЦ): 1232816. ORCID ID: 0009-0007-7337-8695. personal@eapelikh.ru. ✉.



Брыкин Вениамин Андреевич, 1996 г.р. Окончил МАИ в 2023 г., к.т.н. (2024). Инженер НИО-904 кафедры инженерной графики МАИ. В списке научных трудов 23 работы в области аддитивного производства, материаловедения и управления качеством производственных процессов. ORCID ID: 0000-0002-7456-9879; AuthorID (РИНЦ): 1056862; Author ID (Scopus): 57219448628. brykinva@mai.ru

Колтаков Артур Алексеевич, 1991 г.р. Окончил Воронежский государственный технический университет в 2014 г. Инженер АО «Эколибри». Область научных интересов: проектирование и топологическая оптимизация новых конструкций ДВС, новые методы производства деталей ДВС. a.k@ecolibri.aero



Поступила в редакцию 01.08.2025, после рецензирования 16.10.2025. Принята к публикации 22.10.2025.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-614-628

Topology optimization of components using an implicit geometric model representation

© 2025, A.V. Ripetskiy¹, E.A. Pelikh¹ ✉, V.A. Brykin¹, A.A. Koltakov²

¹Moscow Aviation Institute (National Research University, MAI), Moscow, Russia

²JSC Ecolibri, Moscow, Russia

Abstract

This paper explores methods for topological optimization of structures and the particularities of their implementation. It describes lattice and other complex geometric structures with regularly repeating unit cells that provide non-solid internal filling of components, taking into account the feasibility of their fabrication using additive manufacturing technologies. A case study of topological optimization using an implicit geometric model representation was conducted for a component intended for production via selective laser melting of metal powder alloys. The optimization resulted in a 27% reduction in the component's mass without compromising its mechanical strength, achieved through modification

of the internal geometry. The study emphasizes the importance of verifying the results of topological optimization under operational loads while accounting for the specific characteristics of additive manufacturing technologies.

Keywords: *geometric model, topological optimization, mass, structure, additive manufacturing, selective laser melting.*

For citation: *Ripetskiy AV, Pelikh EA, Brykin AV, Koltakov AA. Topology optimization of components using an implicit geometric model representation [In Russian]. Ontology of designing. 2025; 15(4): 614-628. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-614-628.*

Funding: the study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project code FSFF-2023-0004).

Authors' contributions *Ripetskiy A.V.* – research planning; *Pelikh E.A.* – data analysis and presentation of results; *Brykin V.A.* – conducting the study and interpreting the results; *Koltakov A.A.* – data analysis and interpretation.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures

- Figure 1 – (a) CAD model of the push rod housing base in nTopology; (b) STEP model and fixation/loading zones in nTopology; (c) design area of the component; (d) MP-1400 engine; (e) R-265 vertical take-off and landing unmanned aerial vehicle
- Figure 2 – (a) Mesh generated from the CAD model; (b) reconstructed finite element (FE) mesh
- Figure 3 – Loading conditions for: (a) nominal operating mode; (b) peak operating mode
- Figure 4 – Static analysis results: (a) displacement field; (b) stress distribution
- Figure 5 – Optimization result: material density distribution
- Figure 6 – Variants of component geometry (topology) after optimization. Cut-off threshold: (a) 0.1; (b) 0.3; (c) 1; (d) 0.5
- Figure 7 – (a) Component model after topological optimization and smoothing; (b) regions of the original CAD geometry not included in the topologically optimized model
- Figure 8 – (a, b) Cross-sections of the component with TPMP (triply periodic minimal surface) infill; (c, d) final structure after merging the shell, gyroid infill, and optimized frame (transverse and frontal sections); (e) cut-out for powder removal from the TPMP structure

References

- [1] **Komarov VA.** Theoretical basis for design of load-bearing structures produced using additive technologies [In Russian]. *Ontology of designing*. 2017; 7(2): 191-206. - DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-2-191-206.
- [2] **Kosmodemyansky EV, Nagiev AV, Izratov DYU, Kirpichev VA, Davydov PA, Markarova AA, Kozlova IV, Okutin AYU, Pustovalov AYU.** Space rocket complex project on the basis of a super-light class rocket-c [In Russian]. *Ontology of designing*. 2018; 8(4): 523-539. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-4-523-539.
- [3] **Tkachenko IS.** Analysis of key technologies for creating multi-satellite orbital constellations based on of small spacecraft / [In Russian]. *Ontology of designing*. 2021; 11(4): 478-499. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-478-499.
- [4] **Gribova VV, Kulchin YuN, Nikitin AI, Timchenko VA.** An ensemble of ontological models for intelligent support of laser additive manufacturing processes [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(2): 279-300. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-2-279-300.
- [5] **Kishov EA.** Mathematical modeling of non-stationary heat transfer in selective laser melting based on machine learning [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(1): 142-151. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-142-151.
- [6] ISO/ASTM 52910:2018. Additive manufacturing - Design - Requirements, guidelines and recommendations. – Geneva: ISO/ASTM International, 2018. 24 p.
- [7] ISO/ASTM 52911-1:2019. Additive manufacturing - Design - Part 1: Laser-based powder bed fusion of metals. – Geneva: ISO/ASTM International, 2019. 38 p.
- [8] **Bendsoe MP, Sigmund O.** Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications. Berlin; Heidelberg: Springer, 2003. 370 p.
- [9] **Deaton JD, Grandhi RV.** A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2014; 49(1): 1–38. DOI: 10.1007/s00158-013-0956-z.

- [10] **Sokolowski J, Zolésio J-P.** Introduction to Shape Optimization: Shape Sensitivity Analysis. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1992. 250 p.
- [11] **Henrot A, Pierre M.** Variation et optimisation de formes: Une analyse géométrique. Berlin: Springer, 2005. 360 p.
- [12] **Arora JS.** Introduction to Optimum Design. 4th ed. Oxford: Academic Press (Elsevier), 2016. 968 p.
- [13] **Kirsch U.** Optimum structural design: concepts, methods, and applications. New York: McGraw-Hill, 1981. 441 p.
- [14] **Burchill MA, Paulino GH.** A framework for optimal design of free-form holes in plates using an integral-equation approach. *Computers & Structures*. 2004; 82(23–26): 1823–1840. DOI: 10.1016/j.compstruc.2004.05.013.
- [15] **Rezaeepazhand J, Jafari M.** Stress analysis of perforated composite plates. *Composite Structures*. 2005; 71(3–4): 463–468. DOI: 10.1016/j.compstruct.2005.09.003.
- [16] **Wang D, Quek ST, Ang KK.** Global and local buckling analysis of grid-stiffened composite panels. *Composite Structures*. 2015; 119: 20–28. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.08.015.
- [17] **Panesar A, Abdi M, Hickman D., Ashcroft I.** Hierarchical lattice structures: A review. *Additive Manufacturing*. 2018; 19: 81–94. DOI: 10.1016/j.addma.2017.11.003.
- [18] **Maskery I, Sturm L, Aremu AO, Panesar A, Williams CB, Tuck C, Ashcroft I.** Insights into the mechanical properties of several triply periodic minimal surface lattice structures made by polymer AM. *Polymer*. 2018; 152: 62–71. DOI: 10.1016/j.polymer.2017.11.049.
- [19] **Yang L, Harrysson OL, West H, Cormier D.** Mechanical properties of gyroid TPMS for AM. *Additive Manufacturing*. 2018; 25: 126–136. DOI: 10.1016/j.addma.2018.10.036.
- [20] **Wang C, Chen S, Ning X, Zhu J, Wang M.** Generative-Design by Embedding Topology Optimization. *Journal of Mechanical Design*. 2023; 145(11): 114501. DOI: 10.1115/1.4063319.
- [21] **Barbieri L, Colombo G, Degliesposti G, Favi C, Mandorli F.** Performance-driven engineering design approaches: from topology optimization to generative design. *Applied Sciences*. 2022; 12(23): 12298. DOI: 10.3390/app122312298.
- [22] nTopology. Structural Optimization: 7 design tips for lighter designs. *nTopology Blog*. 2022. <https://ntopology.com>.
- [23] **Schmelzle J, Kline E, Dickman CJ, Reutzel EW, Jones G, Simpson TW.** (Re)Designing for part consolidation: Understanding the challenges of AM. *Journal of Mechanical Design*. 2015; 137(11): 111404. DOI: 10.1115/1.4031156.
- [24] **Yang S, Zhao YF.** Additive manufacturing-enabled part count reduction: a lifecycle perspective. *Journal of Manufacturing Processes*. 2015; 20(3): 316–322. DOI: 10.1016/j.jmapro.2015.07.001.
- [25] **Svanberg K.** The method of moving asymptotes — a new method for structural optimization. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1987; 24(2): 359–373. DOI: 10.1002/nme.1620240207.
- [26] **Svanberg K.** A class of globally convergent optimization methods based on conservative convex separable approximations. *SIAM Journal on Optimization*. 2002; 12(2): 555–573. DOI: 10.1137/S1052623499362822.
- [27] **Bendsoe MP.** Optimal shape design as a material distribution problem. *Structural Optimization*. 1989; 1(4): 193–202. DOI: 10.1007/BF01650949.
- [28] **Rietz A.** Sufficiency of a finite exponent in SIMP (power law) methods. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2001; 21(2): 159–163. DOI: 10.1007/s001580050180.
- [29] **Tanskanen P.** The evolutionary structural optimization method: theoretical aspects. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2002; 191(47–48): 5485–5498. DOI: 10.1016/S0045-7825(02)00436-1.
- [30] **Huang X, Xie YM.** Evolutionary topology optimization of continuum structures: methods and applications. Chichester: Wiley, 2010. 309 p.
- [31] **Wang MY, Wang X, Guo D.** A level set method for structural topology optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2003; 192(1–2): 227–246. DOI: 10.1016/S0045-7825(02)00559-5.
- [32] **Allaire G, Jouve F, Toader AM.** Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method. *Journal of Computational Physics*. 2004; 194(1): 363–393. DOI: 10.1016/j.jcp.2003.09.032.
- [33] **Allaire G.** Shape Optimization by the Homogenization Method. New York: Springer, 2002. 456 p.
- [34] **Song R, Liu Z, Wang X.** Lattice design and advanced modeling to guide the design of high-performance lightweight structural materials. *Energies*. 2024; 17(6): 1468. DOI: 10.3390/en17061468.
- [35] **Bertolini M., et al.** Evaluation of segmentation accuracy and its impact on CFD results: comparison of Mimics (Materialise) и 3D Slicer. *The Visual Computer*. 2022; 38(10): 3465–3478. DOI: 10.1007/s00371-021-02288-y.
- [36] **Peto M, Foy C, McPhillips M., et al.** Review on Structural Optimization Techniques for Additively Manufactured Implantable Medical Devices. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2024; 10. Art.1353108. DOI: 10.3389/fmech.2024.1353108.
- [37] **Özdemir M.** Light-Weight Design of Aerospace Components Using Genetic and Dandelion Optimization Algorithms. *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*. 2024; 17(2): 47–58.

About the authors

Andrey Vladimirovich Ripetskiy (b. 1979) graduated from Moscow Aviation Institute in 2002, Candidate of Technical Science (2006). Associate Professor at the Department of Engineering Graphics, Moscow Aviation Institute. Head of the Additive Technologies Laboratory at the Center for Aerospace Materials and Technologies of the Advanced Engineering School of MAI. Author of more than 120 scientific publications in the field of additive manufacturing. Author ID (RINC): 144971; ORCID ID: 0000-0003-3446-6717. Author ID (Scopus): 55976658900; Researcher ID (WoS): S-6932-2019. *a.ripetskiy@mail.ru*.

Evgeni Alexandrovich Pelikh (b. 1999) graduated from Moscow Aviation Institute in 2017. Researcher at the Department of Engineering Graphics, Moscow Aviation Institute, a co-author of about 10 scientific publications. ORCID ID: 0009-0007-7337-8695. Author ID (RSCI): 1232816. *personal@eapelikh.ru* ✉.

Veniamin Andreevich Brykin (b. 1996) graduated from MAI in 2023, Candidate of Technical Science (2024). Engineer at the Department of Engineering Graphics, Moscow Aviation Institute. His list of scientific works includes 23 papers in the fields of additive manufacturing, materials science, and quality management of production processes. ORCID ID: 0000-0002-7456-9879. AuthorID (RINC): 1056862; Author ID (Scopus): 57219448628. *brykinva@mai.ru*.

Artur Alexeevich Koltakov (b. 1991) graduated from Voronezh State Technical University in 2014. Engineer at Ecolibri JSC. Research interests include the design and topological optimization of new internal combustion engine structures and novel manufacturing methods for engine components. *a.k@ecolibri.aero*

Received August 1, 2025. Revised October 16, 2025. Accepted October 22, 2025.
